

# Il dissesto di un transetto della Cattedrale di Lucca: studio multidisciplinare, progetto di restauro e realizzazione di un sostegno attivo per la sua attuazione

Natale GUCCI - Anna DE FALCO

## ABSTRACT

*Circa quindici anni fa il muro ovest del transetto sinistro della cattedrale di Lucca manifestò sintomi di un grave dissesto dovuto alla sua particolare morfologia interna, alle vicende costruttive e alla vetustà.*

*Si presenta lo studio del dissesto, il progetto di restauro e si descrive l'originale apposita struttura di presidio che attualmente sostiene la parte alta del transetto, in attesa che l'intervento sia completato.*

*Tenendo conto anche dei documenti di archivio e delle analisi archeologiche, si giustifica per via teorica il dissesto del muro basandosi su rilevamenti fisici multidisciplinari e facendo così emergere il serio rischio di crollo corso per instabilità del paramento esterno, che fu prontamente scongiurato con tempestivi interventi provvisori di tamponamento e cerchiatura.*

*Si descrive quindi l'importante struttura che agisce in modo attivo e senza invasione della chiesa, così da consentire la sostituzione delle parti ammalorate, pur conservando in sito le importanti decorazioni marmoree fino a ripristinare in modo completo l'aspetto originale della costruzione.*

**PAROLE CHIAVE:** edifici monumentali, muratura, consolidamento, restauro, sostegno attivo.

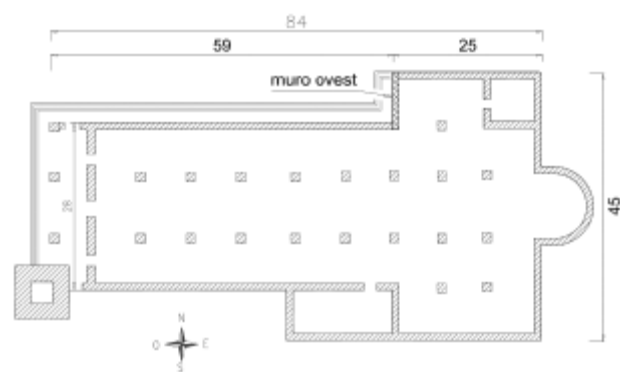
## 1. PREMESSA

Il Duomo di S. Martino a Lucca fu fatto costruire da Anselmo da Baggio nel 1060 sulla base di un

primo nucleo risalente al X secolo e ha raggiunto l'aspetto odierno solo nel XVI secolo (Fig. 1).



Fig. 1 - Il Duomo di Lucca.



Il muro ovest del transetto, della lunghezza complessiva di circa 9 m e altezza 28 m, sostiene la copertura e una volta di mattoni, a crociera rialzata, dello spessore di una testa. Al centro, il grande portale di ingresso con l'ampia strombatura realizza un'apertura nella parete di oltre 30 mq, è sormontato da una finestra larga circa 2 m e riduce di oltre la metà la base del muro (Fig. 2).

A circa 23 m da terra, una grossa catena lignea, databile al XVII secolo, corre orizzontale sul lato interno, similmente e più in basso, alle quote di 21,50 m e 16,50 m, si trovano due catene metalliche (quadrello da 4 cm) risalenti alla seconda metà del '700, quando furono attuati interventi di rinforzo.

Lo spessore del muro, di circa 1,15 m, è composto da tre strati: un paramento esterno a facciavista di circa 15 cm e una cortina di pietrame

intonacata di circa 20 cm; il nucleo è costituito da scapoli di pietra e frammenti di laterizio murati con abbondante malta. Il paramento esterno è realizzato con conci di calcare che ottengono la continuità della facciata con lavorazioni che sono accurate solo in prossimità della superficie, laddove il contatto tra le pietre diviene diretto e i giunti di malta quasi invisibili. Il paramento interno alla chiesa, una volta privato dell'intonaco, ha mostrato le caratteristiche di un'ordinaria muratura di bozze (verrucano) disposte in modo tendenzialmente orizzontale e allettate con malta. Il nucleo ha caratteristiche molto diverse: in esso la quantità di malta è molto superiore e si rileva anche una frequente e irregolare presenza di gesso dovuta ad antichi interventi di rinforzo con cucì e scuci effettuati in condizioni statiche precarie che richiedevano rapidità di presa.

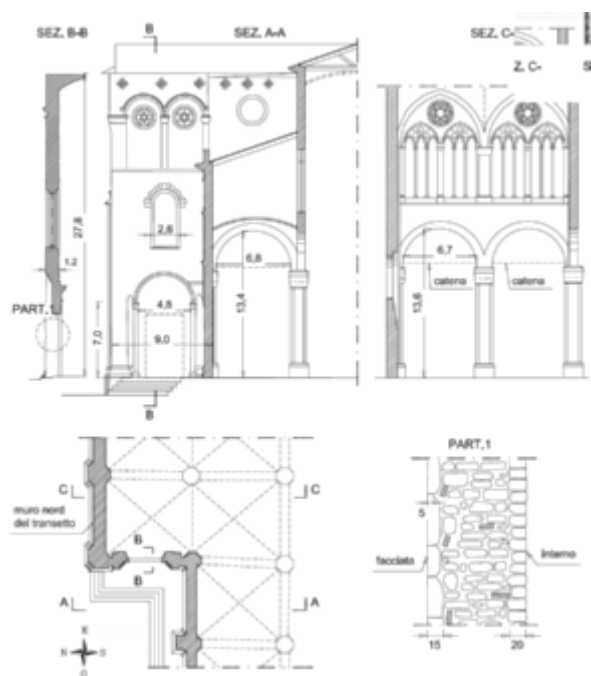


Fig. 2 - Pianta e sezioni del transetto sinistro.

I tre strati del muro non sono fra loro connessi, in particolare il paramento esterno risulta rimaneggiato in epoche successive e localmente è distaccato dal nucleo e privo di diatoni; tuttavia l'irregolarità dei conci vi rende possibile il trasferimento di azioni verticali per ingranamento.

Parte della muratura della facciata interna alla chiesa (fino all'altezza della finestra), appartiene al nucleo più antico della fabbrica e pare sia stato utilizzato nell'XI secolo nella realizzazione dello stato attuale.

## 2. L'ANALISI DEL DISSESTO

### Le indagini

Il dissesto del muro ovest del transetto sinistro si manifestò circa quindici anni fa con la caduta di schegge dal paramento lapideo esterno.

Nei primi sopralluoghi furono rilevate evidenti sconnessioni sul paramento, accompagnate da rotture di qualche concio. In particolare le quattro colonnine di marmo accantonate ai lati del portale apparivano visibilmente inflesse, con uno spanciamiento di qualche centimetro. Un carotaggio raffreddato ad acqua subito effettuato produsse gesso dilavato e frammenti di pietra e laterizio. Ciò consigliò l'immediato tamponamento del portale e la cerchiatura della soprastante finestra.

Le indagini continuarono quindi con saggi, rilievi topografici e fotogrammetrici dai quali si apprese che:

- la malta prelevata sulla facciata interna alla chiesa, sopra l'architrave della grande apertura, risultava umida ed estremamente plastica al tatto, così da far pensare non solo ad infiltrazioni d'acqua, denunciate dalle efflorescenze e dal sol-

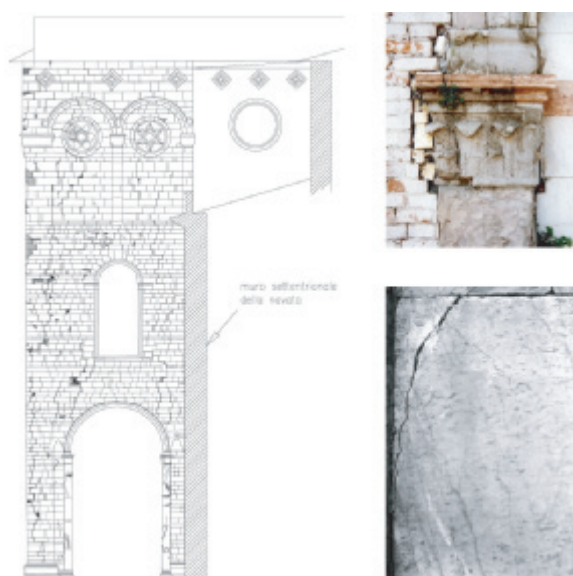


Fig. 3  
a) Quadro fessurativo sul paramento esterno della parete dissestata.  
b) Fessura nella cornice sullo stipite del portale.  
c) Fessura sullo spigolo di un concio del paramento esterno in prossimità dell'imposta dell'arco.

levamento dell'intonaco sul lato interno, ma anche a contenuti di gesso particolarmente pericolosi; in tale zona l'andamento dei giunti evidenzia anche importanti abbassamenti.

- il quadro fessurativo della facciata esterna (Fig. 3) mostra linee di separazione tra i conci, la più importante delle quali, sulla sinistra, scende in prossimità dello spigolo esterno senza soluzione di continuità e rivela un distacco fra i due muri visibile anche all'interno e nel sottotetto;

- in basso, detta lesione interessa anche i conci di pietra e le paraste in breccia rosata che decorano gli stipiti del portale, evidenziando colà sofferenze per eccessiva compressione.

- la parete nord del transetto strapiomba verso l'esterno di circa l'1%, in modo coerente con il quadro fessurativo osservato;

Le successive misure penetrometriche sui giunti di malta del paramento interno, effettuate con la tecnica PNT-G [1], hanno mostrato una resistenza media a compressione di 5 daN/cm<sup>2</sup> e rilevato l'ancor più debole consistenza della malta del nucleo interno. L'irregolarità e la scarsa qualità dei materiali costituenti questo nucleo, particolarmente nella zona centrale ed inferiore, è poi stata evidenziata dai saggi nelle buche pontate, dalle numerose indagini endoscopiche e dai carotaggi a secco.

Indagini microsismiche sono state condotte sia sulla parete dissestata, sia sulle analoghe pareti adiacenti che apparivano in buone condizioni, allo scopo di confrontare consistenza e compattezza e ricavare indicazioni sulle diversità costruttive [4] e [5].

Le misure sono state effettuate per trasparenza, a rifrazione e in modalità tomografica (Fig. 4).

Le misure per trasparenza sul muro ammalorato hanno fornito valori di velocità media del suono

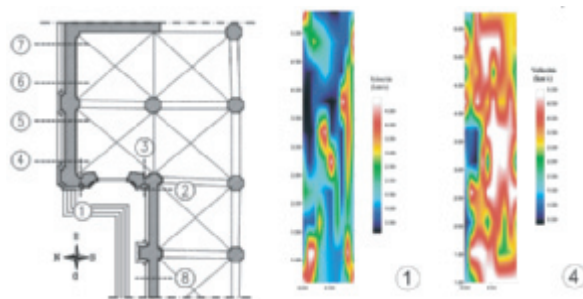


Fig. 4 - Confronto fra tomografie sismiche.

generalmente molto inferiori rispetto alle pareti adiacenti; ciò trova giustificazione nella cattiva qualità dei materiali interni e nelle frequenti discontinuità, peraltro messe in luce dall'indagine in modalità tomografica, e comporta valori medi del modulo di elasticità, seppure abbastanza dispersi, ovunque molto inferiori alle altre pareti, dove sono stati misurati valori sempre vicini a 100.000 daN/cm<sup>2</sup>.

Questi rilevamenti hanno fornito anche le informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei diversi strati che compongono il muro, necessarie per le successive modellazioni.

A differenza delle pareti contigue, il paramento esterno risulta circa 7 volte più rigido rispetto al valor medio dei tre strati del muro.

#### Interpretazione del dissesto

I documenti di archivio e lo studio archeologico [2] hanno rivelato sequenze di costruzione e interventi che inducono considerazioni di natura statica. Sulla base dei risultati delle indagini svolte e con riferimento al quadro fessurativo rilevato, si possono quindi individuare le cause del dissesto in atto.

In base alle indagini storiche e all'osservazione delle tecniche costruttive si conclude che:

- il paramento interessato è stato in parte rimaneggiato con malte ricche di gesso, specialmente in prossimità dello spigolo esterno;

- le tre catene antiche, quella lignea nel sottotetto e le altre due metalliche sottostanti, mostrano che la lesione all'attacco tra le due pareti contigue del transetto si (parete nord e parete ovest) era manifestata e riaperta più volte già a partire dal XVIII secolo;

- nella seconda metà del XVIII secolo è stato eseguito il rinforzo della base del muro nord del transetto, come si apprende da un documento del 1784 che lo definisce "...poco proporzionato all'impulsione che riceve tanto per debole costruzione che per sottigliezza" [3]. Nello stesso periodo è stato realizzato anche l'incatenamento degli archi del transetto gravanti sulla stessa parete.

Lo studio oggettivo dell'attuale situazione statica suggerisce le seguenti considerazioni:

- nello spessore del muro si trovano zone rigide non viscosse associate a zone deformabili e viscosse. Il paramento esterno, costituito da conci di pietra in contatto diretto sui bordi esterni, è molto più rigido rispetto agli altri due strati, particolarmente rispetto al nucleo, dove abbondano la malta e i vuoti;

- i piedritti della grande apertura di ingresso sono parte di una muratura precedente e insufficienti in tale ruolo per qualità e dimensioni;

- le varie fessure sul paramento esterno hanno consentito alla pioggia di imbibire il nucleo originando un processo che ha via via esaltato il degrado di quella muratura ricca di gesso; tale fessurazione è a sua volta stata incrementata dalla spinta degli archi del transetto che ha generato lo strapiombo della parete nord. Ciò trova conferma anche nell'intervento di rinforzo del XVIII secolo.

È possibile così tracciare la storia di carico dei tre strati della parete ammalorata.

Per effetto del degrado del nucleo interno e della diversa tendenza degli strati agli scorri-

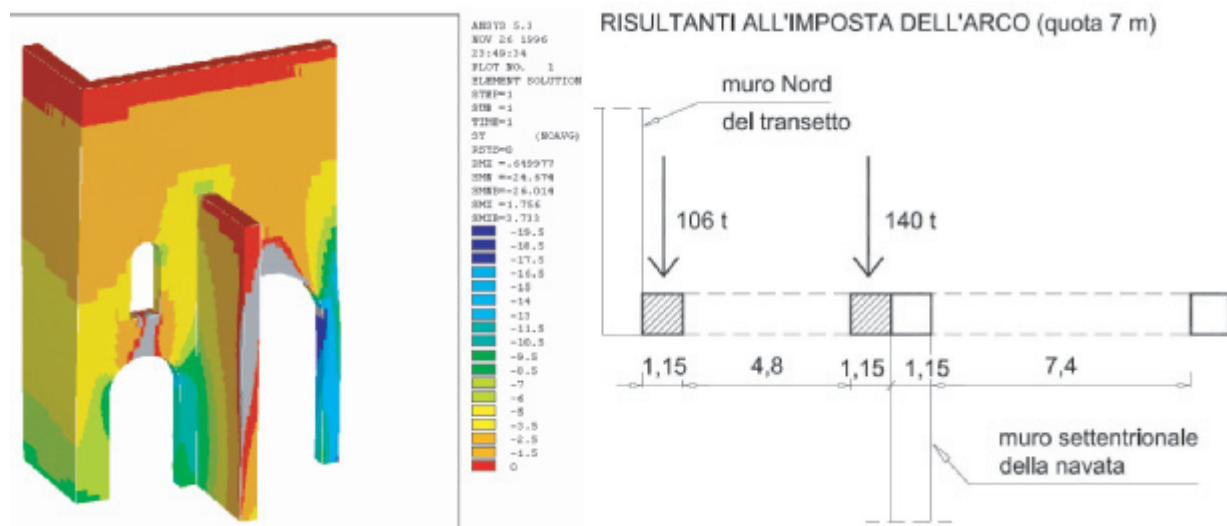


Fig. 5 - Il modello agli elementi finiti del transetto con lo schema delle risultanti sulla sezione orizzontale all'imposta dell'arco.



menti viscosi si è verificata la migrazione degli sforzi verso il paramento calcareo esterno che ha così subito nel tempo un notevole incremento di carico; ciò ha messo in crisi la parte della parete che realizza gli stipiti della grande apertura. Ne è conseguito un sovraccarico anche delle cornici e delle colonnine accantonate. Le pressioni fra i conci di facciata, in assenza di malta che regolarizza il contatto, hanno raggiunto valori locali al limite della resistenza del materiale; ciò ha provocato in molti punti la rottura degli spigoli delle pietre, con il distacco e la caduta di schegge che ha segnalato il dissesto.

Le recenti prove con i martinetti piatti sul tamponamento di presidio (inizialmente non messo in forza per il rispetto delle decorazioni marmoree) del grande portale hanno mostrato che, dal 1994, il processo di dissesto del muro ha proseguito trasferendo su quel tamponamento gran parte del carico che prima fluiva sugli stipiti del portale; infatti il tamponamento risulta attualmente sollecitato da un carico ben superiore al suo peso proprio, carico che, tra l'altro, agisce con eccentricità verso l'esterno. Questa circostanza mostra che il carico fluisce prevalentemente attraverso il paramento esterno, mette in evidenza come la chiusura del vano abbia evitato il crollo e costituisce un importante avallo della correttezza della progettazione.

### 3. LA MODELLAZIONE

Sulla base dei rilevamenti descritti, la modellazione statica ha dato indicazioni sul cimento del muro ammalorato prima dell'attuazione degli interventi di presidio ed ha permesso di valutare il rischio corso.

Inizialmente, allo scopo di stimare i carichi alla base e all'imposta dell'arco del portale, è stata eseguita un'analisi elastica globale a sezione omogenea su uno schema tridimensionale che comprende l'intero muro insieme a porzioni di pareti adiacenti (Fig. 5) e utilizza valori medi di rigidità e peso specifico dedotti dalle indagini in situ.

Il calcolo, effettuato con un codice agli elementi finiti, ha indicato valori medi di compressione non superiori ai 10 daN/cm<sup>2</sup>, valori bassi per giustificare il dissesto che è pertanto da ascrivere all'eterogeneità di rigidità e resistenza dei tre strati del muro, resistenza che, in queste condizioni, non può che esplicarsi in serie. Successivamente, per apprezzare l'ordine di grandezza delle tensioni all'interno dei diversi strati, è stata studiata agli elementi finiti una sezione verticale nella zona adiacente alla grande apertura, con un modello multistrato (fig. 6a) in stato piano di deformazione che si avvale anche dell'analisi tridimensionale già svolta.

Per poter operare su un corpo prismatico equivalente alla situazione reale, si sono simulate le variazioni geometriche in elevato alterando il peso di volume dei materiali nella zona sopra l'arco, in modo da riprodurre, al livello del-

l'imposta, il carico medio mostrato dal modello tridimensionale.

Sono state adottate le caratteristiche meccaniche desunte dalle indagini in situ, integrate con parametri tipici dei singoli elementi.

Questo studio fornisce una tensione normale media all'interno dello strato più rigido di circa 50 daN/cm<sup>2</sup> e una tensione tangenziale verticale fra gli strati molto piccola (0,15 daN/cm<sup>2</sup>).

Valori simili di compressione sono il risultato di un'indagine analitica di conferma (fig. 6b) che assimila il corpo prismatico del muro ad una trave a sezione composta. Si definiscono così coefficienti di omogeneizzazione ipotizzando perfetta solidarietà fra gli strati e rispettando la conservazione delle sezioni piane. Con questo metodo il valore della risultante sul paramento esterno è stato calcolato pari a circa 900 kN/m, corrispondente a 60 daN/cm<sup>2</sup> (15 cm di spessore medio).

Le modellazioni di cui sopra avallano la percezione di ciò che avviene realmente all'interno del muro: il paramento di facciata ha spessore medio di 15 cm (ma localmente anche molto inferiore), è costruito con lastre non regolari, con superfici di contatto alquanto ridotte e variabili, quindi, per una stima realistica dello stato di tensione, è necessario tener conto dei restringimenti di spessore che comportano concentrazioni di tensioni. Nel caso frequente che il contatto diretto delle lastre si riduca localmente a soli 5 cm, si ottengono picchi di tensione di 180 daN/cm<sup>2</sup>.

Il contatto diretto fra superfici di materiale fragile, quale il calcare in questione, origina però picchi di tensione per le irregolarità proprie delle esecuzioni manuali fino a generare inneschi di rottura ai quali sono da attribuire le schegge cadute che hanno denunciato il dissesto. Naturalmente l'espulsione delle schegge ha provocato una locale redistribuzione delle pressioni di contatto rendendole sostenibili fino a nuove evoluzioni del fenomeno. Come più avanti è esposto, il pericolo di collasso è infatti da attribuire, piuttosto che alla rottura del materiale, a inneschi di crollo legati alla stabilità del paramento, costituito di fatto da elementi giustapposti, inadeguatamente vincolati al nucleo del muro, peraltro di per sé inadeguato a rendere stabile l'assieme.

Una volta effettuata una stima del carico sul paramento esterno, è stato possibile eseguire una verifica della stabilità del suo equilibrio nella zona di maggior sollecitazione, cioè nelle porzioni basse di muro tra il pavimento della chiesa e l'imposta dell'arco (stipiti), trascurandone la debole resistenza allo "scollamento" dal nucleo. Poiché il carico è eccentrico, la stabilità va considerata in regime di pressoflessione.

Per poter valutare il carico critico del paramento, si è fatto riferimento ai risultati di precedenti studi [6] sul comportamento di un pilastro di materiale non resistente a trazione, compresso eccentricamente.

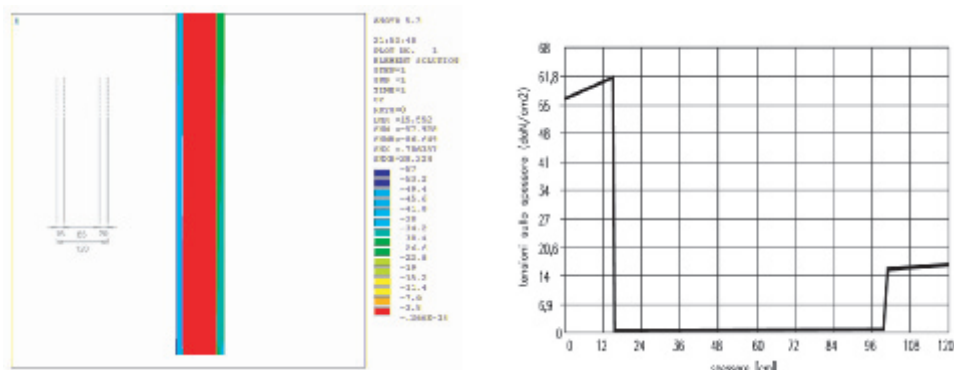


Fig. 6  
a) Il modello agli elementi finiti della sezione verticale del muro in stato piano di deformazione.  
b) Compressioni nei tre strati del muro ottenute col modello analitico.

La figura 7 illustra la specializzazione alla fattispecie, indicando la relazione fra forza normale e spostamento laterale di una striscia del paramento, per quattro diversi valori dell'eccentricità del carico.

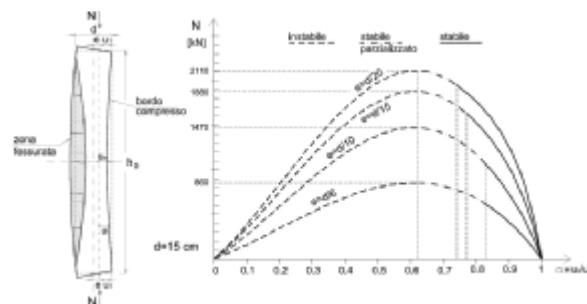


Fig. 7 - Curve carico-spostamento di una striscia del paramento esterno per alcuni valori dell'eccentricità. I parametri  $u_1$  e  $u_0$  sono legati rispettivamente all'eccentricità e all'inflessione; ambedue rappresentano infatti la distanza della linea di azione della forza dal bordo compresso della sezione, rispettivamente in sommità e in mezzzeria. Il loro rapporto  $\alpha = u_0/u_1$  è un parametro adimensionale di deformazione che tiene conto dell'eccentricità: è pari all'unità per struttura indeformata ed è nullo quando la retta di azione del carico è tangente al bordo della sezione di mezzzeria. Il processo di carico inizia dunque per  $\alpha=1$ , con struttura indeformata e valore nullo del carico, e procede sul ramo stabile fino al valore del carico critico, che si attinge in corrispondenza del massimo di ogni curva (per  $\alpha = 0,625$ ).

Secondo questo modello, già per un'eccentricità, comunque orientata, di soli 2,5 cm, pari a 1/6 dei 15 cm di spessore del paramento, il carico reale raggiunge il carico critico. Ciò mostra che, prima dell'intervento di presidio, il paramento si trovava in stato di incipiente collasso: tale eccentricità è infatti compatibile con la geometria della cortina.

Ricordando che trattasi di fenomeni di instabilità, queste considerazioni mostrano che un improvviso collasso del paramento ha reali probabilità di manifestarsi anche se attualmente non si osservano scostamenti dalla verticale.

Ciò conferma il ruolo del tamponamento della grande apertura e della cerchiatura della finestra, a suo tempo urgentemente effettuati, e, per ripristinare il transetto, rende indispensabile un intervento che scarichi tali strutture provvisorie e renda atti gli stipiti a sostenere anche i carichi che attualmente sono fluiti su di esse.

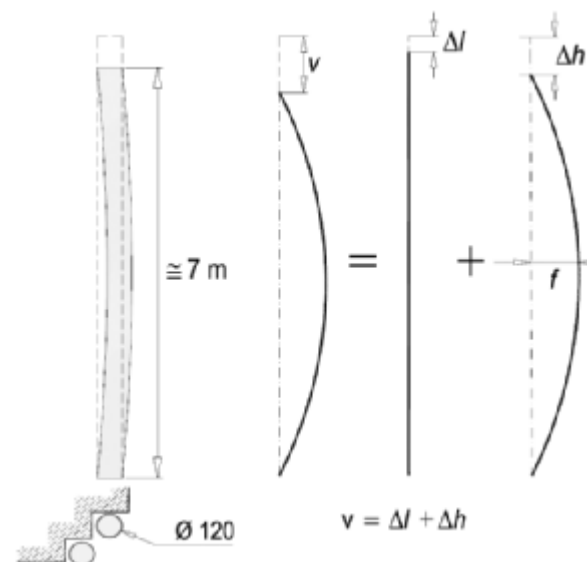


Fig. 8  
a) Le colonnine accantonate sugli stipiti del portale.  
b) Calo della testa delle colonnine per effetto della deformazione elastica e dell'inflessione.

L'esame delle deformazioni rilevate sulle snelle colonnine di marmo monolitiche, accantonate sugli stipiti del portale, conferma il cedimento della muratura. Lo scostamento della mezzzeria delle colonnine dalla verticale indica infatti un calo della sommità che può ritenersi composto da un accorciamento elastico della colonnina sotto il proprio carico critico e dall'abbassamento della sua sommità per effetto della sua inflessione (Fig. 8).

Un calcolo della prima componente e il rilevamento della seconda, dedotto dallo scostamento della colonnina dalla verticale e nell'ipotesi di deformata sinusoidale, indicano che lo schiacciamento degli stipiti è stato rilevante. La relativa dilatazione giustifica ancora una volta la rottura delle parti in pietra a diretto contatto e comprova il pericoloso stato di sofferenza degli stipiti decorati che l'intervento di restauro deve tutelare. Tale fenomeno si può attribuire al sovrapporsi di cedimenti locali per variazione di assetto dei componenti il muro, insieme a comportamenti di tipo reologico.

Il progetto prevede opportunamente l'annullamento dello sforzo nelle colonnine con conseguente recupero di deformazione, senza che queste vengano in alcun modo toccate; si evita così che ulteriori cedimenti della muratura circostante compromettano componenti essenziali della parte del transetto veramente meritevole di salvaguardia.

#### 4. LA STRUTTURA DI PRESIDIO

Il tamponamento del portale e la cerchiatura della finestra garantirebbero la sicurezza statica anche per tempi lunghissimi, ma il restauro del transetto impone ovviamente il ripristino dell'architettura originaria. È stato pertanto inizialmente condotto uno studio rivolto alle possibilità di rinforzo del muro con priorità a interventi che utilizzano i materiali già in opera, cioè senza sostituzioni nel nucleo.

Le caratteristiche e le condizioni del muro hanno però escluso la possibilità del suo risanamento senza sostituzione del suo interno; ciò a causa del gesso, dell'eterogeneità e della mancanza di ammorramento al nucleo dei due paramenti.

L'intervento di rinforzo deve comportare comunque una redistribuzione degli sforzi fra i diversi strati e una modifica della qualità delle diverse componenti della muratura in termini sia di resistenza che di rigidità, cosa peraltro non ottenibile con iniezioni che non sarebbero neppure realizzabili in questo tipo di muratura. Infatti questa, per sua natura, non garantisce uniformità di iniezione ed è vulnerabile da fenomeni chimico-fisici di tipo espansivo per la presenza di gesso. Inoltre la mancanza di ammorramento tra paramenti e nucleo non consente pressioni interne, soprattutto tenendo conto di quanto già evidenziato in merito alla stabilità del paramento esterno.

Il necessario intervento sul muro ha richiesto il sostegno della parte alta della parete, su cui gravano volte e copertura, non tanto per alleggerire il muro sottostante, il cui peso rimarrebbe comunque ancora preponderante, ma per consentire lo smontaggio delle zone ammalorate e la sostituzione del loro nucleo, scaricando così anche le strutture provvisorie per poterle rimuovere. A questo scopo, in collaborazione con lo Studio del Professor Raffaello Bartelletti, è stata realizzata un'importante struttura metallica di presidio, tutta esterna alla chiesa, sulla quale vengono trasferiti in modo attivo i carichi della parte del muro al di sopra dei 21 m, delle volte a crociera e della copertura. Un completo sistema di monitoraggio ha consentito di governare il trasferimento dei carichi dal muro ammalorato alla struttura provvisoria di presidio.

In parallelo sono state adottate ulteriori misure di sicurezza che tengono anche conto di eventi sismici. Queste (Fig. 9) consistono in un ponteggio esterno che impedisce spostamenti orizzontali della parete nord contrastando sul prospiciente edificio, nell'integrazione delle catene dei due archi trasversali e nell'incatenamento dell'arco della navata laterale nord adiacente al muro dissestato. Per ulteriore sicurezza gli archi e le volte interne sono state puntellate con un ponteggio metallico. La porzione di muro destinata a riposare sul-

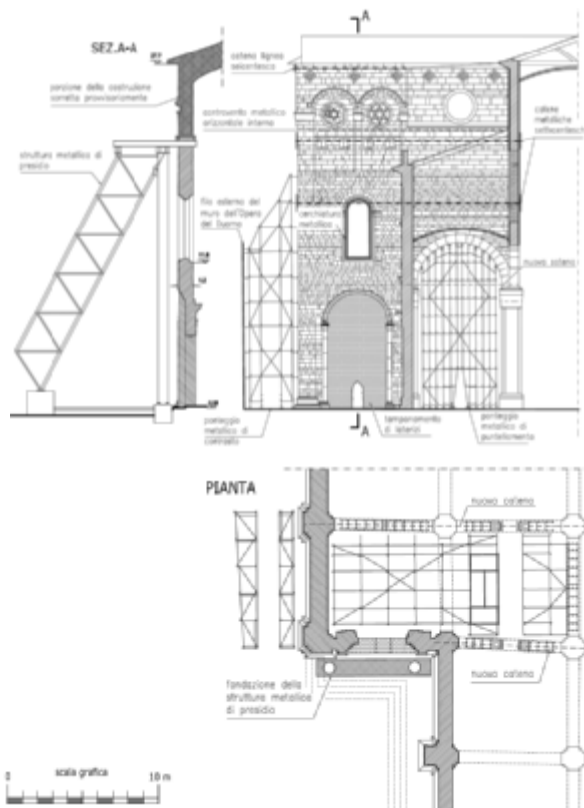


Fig. 9 - Opere di presidio nel transetto.

la struttura metallica è stata controventata e collegata al ponteggio interno.

La struttura metallica sostiene a sbalzo la muratura che viene fatta riposare su una serie di tondi accostati che attraversano il muro e sporgono da entrambi i lati, in modo da poter essere spinti verso l'alto e trasferire il carico del muro alla struttura di presidio scontando via via le sue deformazioni. Questi tondi hanno diametro di 70 mm sono ingrassati, inguainati e inseriti (sigillandoli) in fori di precisione realizzati con carotatrice raffreddata ad aria (Fig. 10).

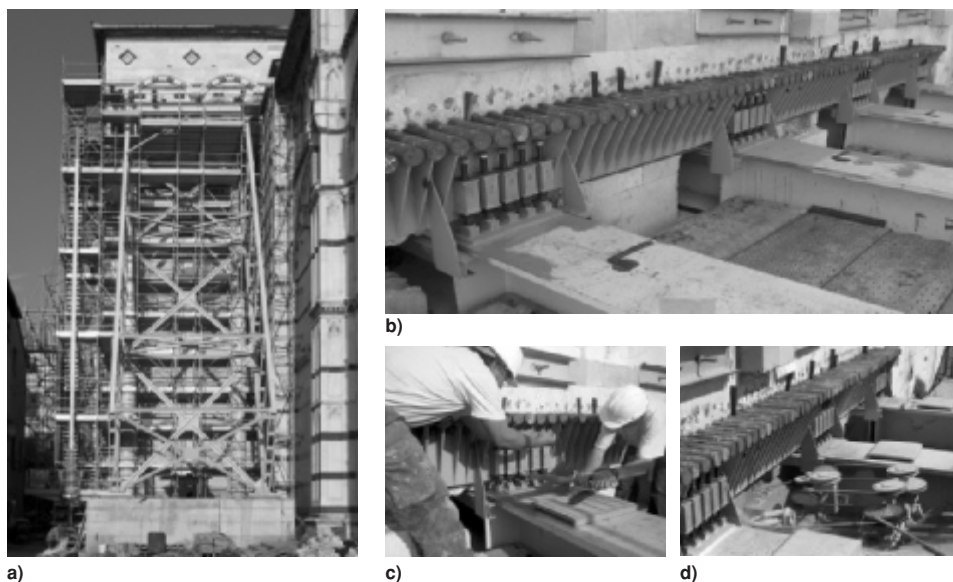


Fig. 10 - a) La struttura metallica di presidio, b) Il dispositivo di sollevamento, c) Le operazioni di messa in forza, d) Il taglio del muro con il filo diamantato.

In figura 10 si può osservare sia i tondi, sia il dispositivo di sollevamento, azionato da 20 viti sulle due facce del muro. Le viti, serrate con chiave dinamometrica in sequenza, contrastano su due profila-



ti a C, saldati ai tondi lungo le facce del muro, e spingono verso il basso le estremità di quattro mensole metalliche. Queste, a loro volta, trasferiscono il carico alle due colonne, mentre l'equilibrio alla rotazione è garantito da un traliccio ancorato a una zavorra di calcestruzzo.

Sedici martinetti piatti disposti sulle due facce del muro, alla base e in prossimità dei tondi, hanno misurato il livello di compressione sui paramenti e, mantenuti in pressione, sono stati utilizzati per il monitoraggio durante e dopo le operazioni di messa in forza della struttura di sostegno.

Le operazioni di messa in carico della struttura metallica sono state condotte a gradini di circa 100kN e il carico è stato controllato ad ogni intervallo attraverso estensimetri elettrici a resistenza collocati sia in sommità sulle quattro mensole, sia alla base, sulle due colonne e sui profilati del traliccio. Una livellazione di precisione ha consentito di misurare gli abbassamenti delle estremità delle mensole metalliche e di apprezzare l'inizio del sollevamento del muro che ha segnalato il completo trasferimento del carico. Ciò si è verificato per circa 900kN, corrispondenti al peso stimato della porzione sostenuta.

Si è ritenuto opportuno successivamente incrementare il carico con un ulteriore forzamento per tener conto delle variazioni termiche negative che originano un abbassamento relativo del sostegno.

L'apertura delle principali lesioni è stata monitorata utilizzando misuratori di spostamento con trasduttore potenziometrico.

Dopo la messa in forza della struttura di presidio è stato eseguito il taglio della parete con filo diamantato appena sotto il dispositivo di sollevamento per liberare il muro sottostante e consentirne il restauro. In questa occasione si è avuto modo di verificare l'effettivo trasferimento del carico sulla struttura accertando l'assenza di movimenti del muro durante il taglio.

Il sistema di monitoraggio consente attualmente di controllare il carico che varia in dipendenza delle variazioni di temperatura per l'iperstaticità del sistema.

I martinetti piatti consentono anche di rilevare che l'aver sorretto la parte superiore della costruzione non ha praticamente ridotto l'ingente carico fluo sul tamponamento di presidio del portale: il peso del muro ancora gravante è infatti preponderante e, probabilmente, il carico della parte alta è migrato, durante il dissesto e successivamente al tamponamento, anche in altre zone limitrofe.

Ne consegue che questo tamponamento ha ora un ruolo essenziale per la sicurezza e che può essere rimosso solo una volta scaricato, quando la sua funzione sia assolta da nuove robuste murature che coronino completamente le decorazioni marmoree del portale, che non debbono esser toccate.

## 5. IL PROGETTO DI RESTAURO

Tenendo conto di quanto sopra, le successive figure illustrano il completamento del progetto di restauro proposto dagli autori, mostrando le operazioni in sequenza, con il risultato di restituire il transetto con la sua architettura intatta e capace di continuare a sfidare i secoli.

## 6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio delle condizioni statiche ha indicato la necessità di sostituire le parti ammalorate del muro del transetto. Infatti la redistribuzione dei carichi fra i tre strati del muro, necessaria per alleviare il pericoloso stato di sovraccarico del paramento esterno, e la conseguente necessaria modifica dei rapporti di rigidità fra le componenti del muro non sarebbero ottenibili con altre tecniche. In particolare le iniezioni non sono praticabili per la massiccia presenza di gesso, per la disuniforme consistenza delle porzioni di muro interessate e, soprattutto, per il sottile rivestimento esterno fortemente caricato, mal connesso con la parte permeabile del muro e in condizioni di incipiente instabilità, circostanza questa che esclude la possibilità di attuare le pressioni interne necessarie per l'iniezione.

Interventi rivolti ad allentare il paramento esterno del muro allargando i giunti per riportare il carico sul nucleo (peraltro con grave danno per l'estetica del monumento) non appaiono proponibili perché il nucleo si è già dimostrato incapace di sostenerlo; in ogni caso si genererebbero deformazioni incompatibili con la parte artistica del portale, colonnine in primis.

Il progetto di restauro prevede quindi lo smontaggio in sequenza di due superfici lisce di circa 40 mq (lasciando comunque intatti in situ sia il portale che la finestra) e la sostituzione del nucleo con muratura di qualità adeguata di quanto all'interno attualmente non utilizzabile. Si ottiene così anche il necessario scarico del tamponamento di presidio.

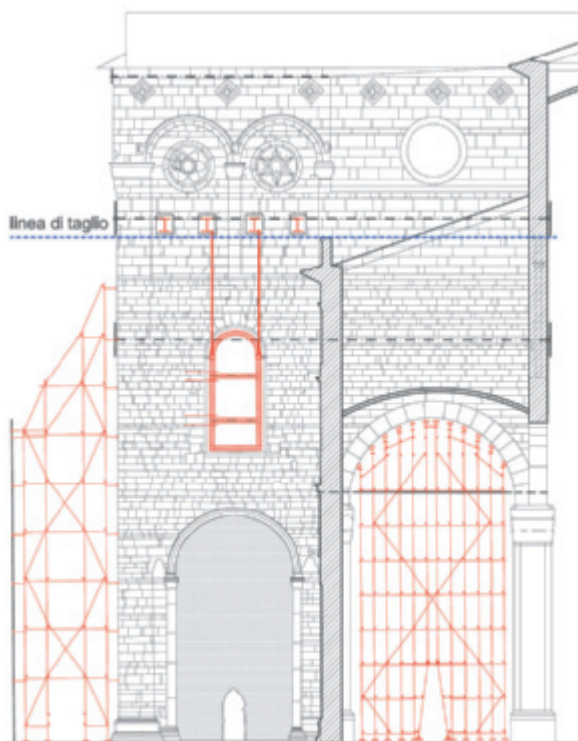
Il rivestimento esterno verrà poi rimontato in modo rigoroso e rifatto l'intonaco interno, operazione peraltro necessaria in ogni caso.

La struttura provvisoria è stata concepita e realizzata a tale scopo.

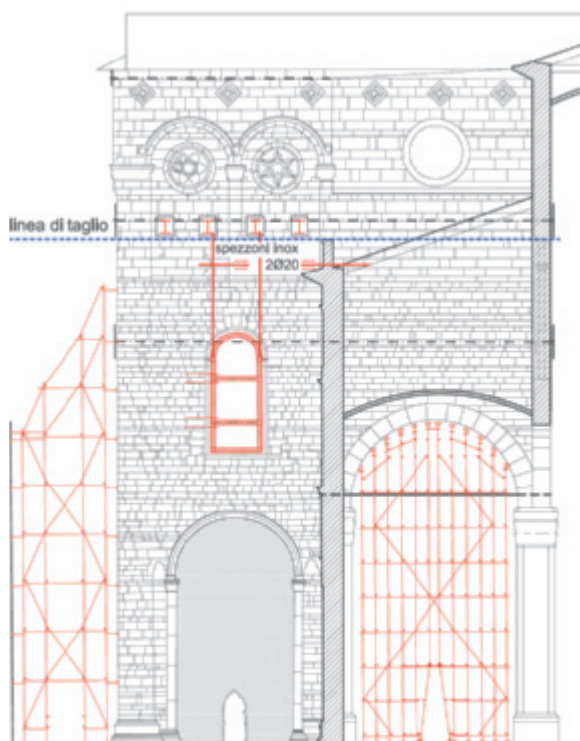
L'intervento è coerente con la cultura che ha caratterizzato l'intera vita della costruzione. La parte interna della muratura, di più antica origine, è infatti stata via via conservata perché ancora utilizzabile, cosa che il progetto ripete sulla base di quanto lo smontaggio evidenzierà.

I lavori sono invece fermi da anni perché alcune porzioni dell'interno del muro sono di origine più antica e quindi ritenute oggi intoccabili (ma impiettriciabili con le iniezioni) da una cultura che rinnega tutto il passato che l'opera rappresenta. Infatti, con le modifiche che il Duomo ha subito nel tempo, la parte del muro più vecchia non fu conservata perché vecchia, ma perché ancora valida.

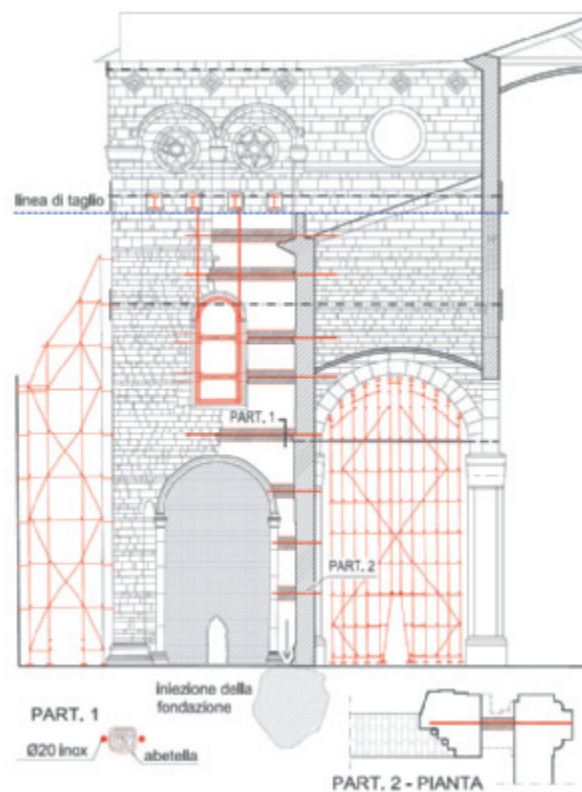
In questa sede ci si astiene da ulteriori commenti su ipotesi di soluzioni staticamente incerte o effimere o di altre culturalmente assurde quale lasciare il portale vistosamente tamponato per conservare l'invisibile interno del muro. Una soluzione di tal genere ricondurrebbe anche alle condizioni di presidio provvisorio del 1994, vanificando così tutti i costi successivi (studi, spese e inagibilità) rivolti alla conservazione dell'architettura del monumento.



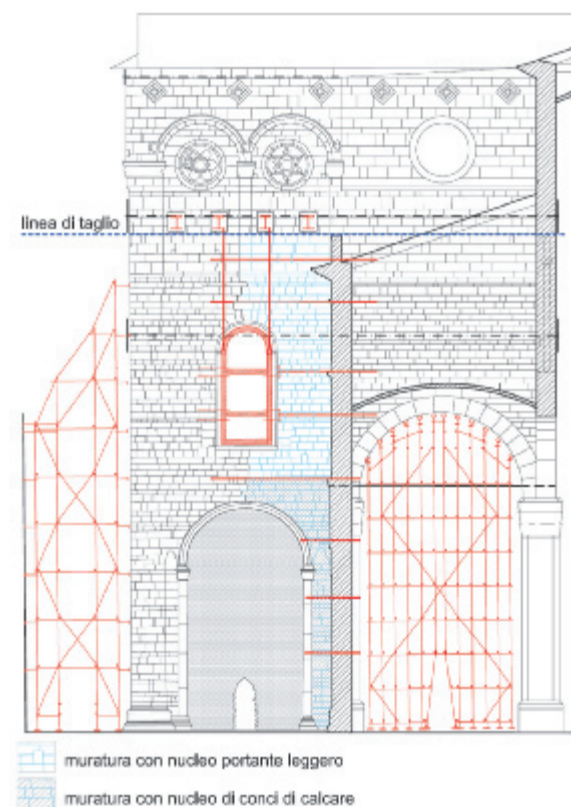
1) Cerchiatura della finestra: messa in opera di due profilati metallici orizzontali a rinforzo della cerchiatura esistente, ancoraggio di questi alla porzione sinistra della parete tramite tasselli, saldatura di testa di due profilati ortogonali alla parete, da ambo i lati del muro, in corrispondenza dei ritti del telaio metallico esistente, e sospensione delle estremità libere di questi alla struttura di presidio.



2) Inizio dello smontaggio della porzione destra del muro con progressivo ancoraggio ad espansione nella muratura adiacente di spezzoni di barre inox da collegare tramite analoga barra inox.



3) Prosecuzione dello smontaggio del muro, con collegamenti progressivi degli spezzoni di barre inox, e inserimento, in corrispondenza delle catene, di travi lignee nel vano della parete a contrasto con la muratura. Iniezione della fondazione al termine dello smontaggio della porzione destra della parete.



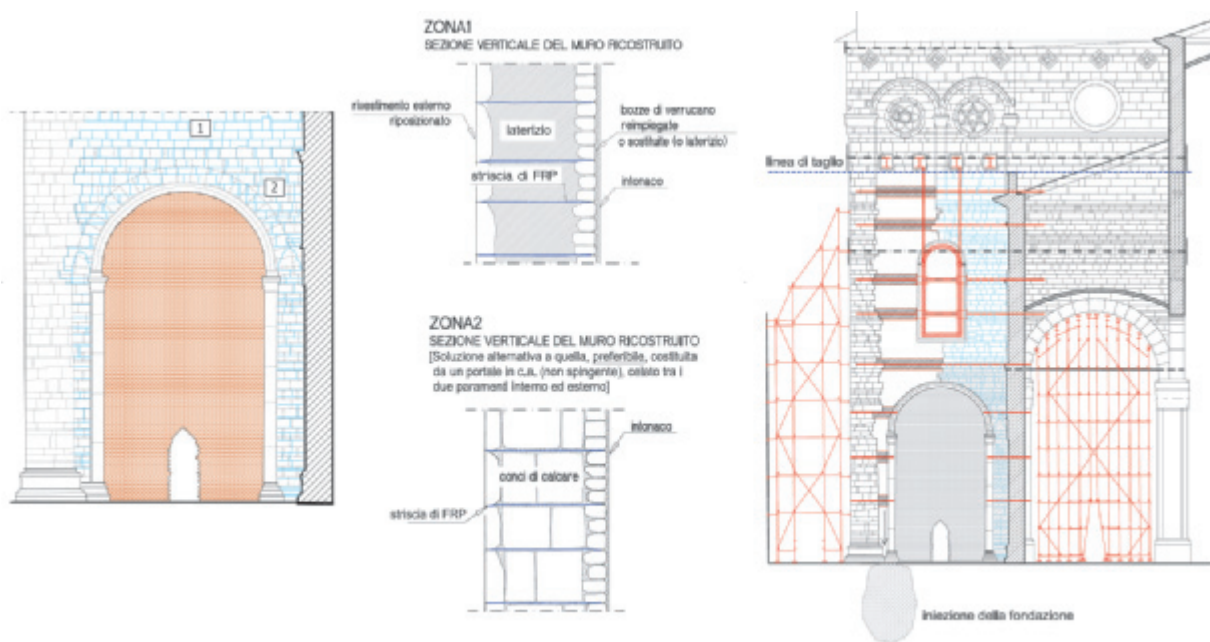
4) Ricostruzione della porzione destra della parete.

Fig. 11a



4 bis) Tipologie murarie da utilizzare per la ricostruzione della parete.

5) Smontaggio della porzione sinistra della parete con i collegamenti inox definitivi e gli sbadacchi in legno provvisori.



6) ricostruzione della porzione sinistra della parete.

7) opera ultimata: smontaggio della muratura di tamponamento del portale - trasferimento del carico delle volte della copertura dalla struttura metallica al nuovo nucleo interno della muratura - ripristino delle zone interessate dalla struttura di presidio - rimozione dei ponteggi interni ed esterni e della cerchiatura della finestra.

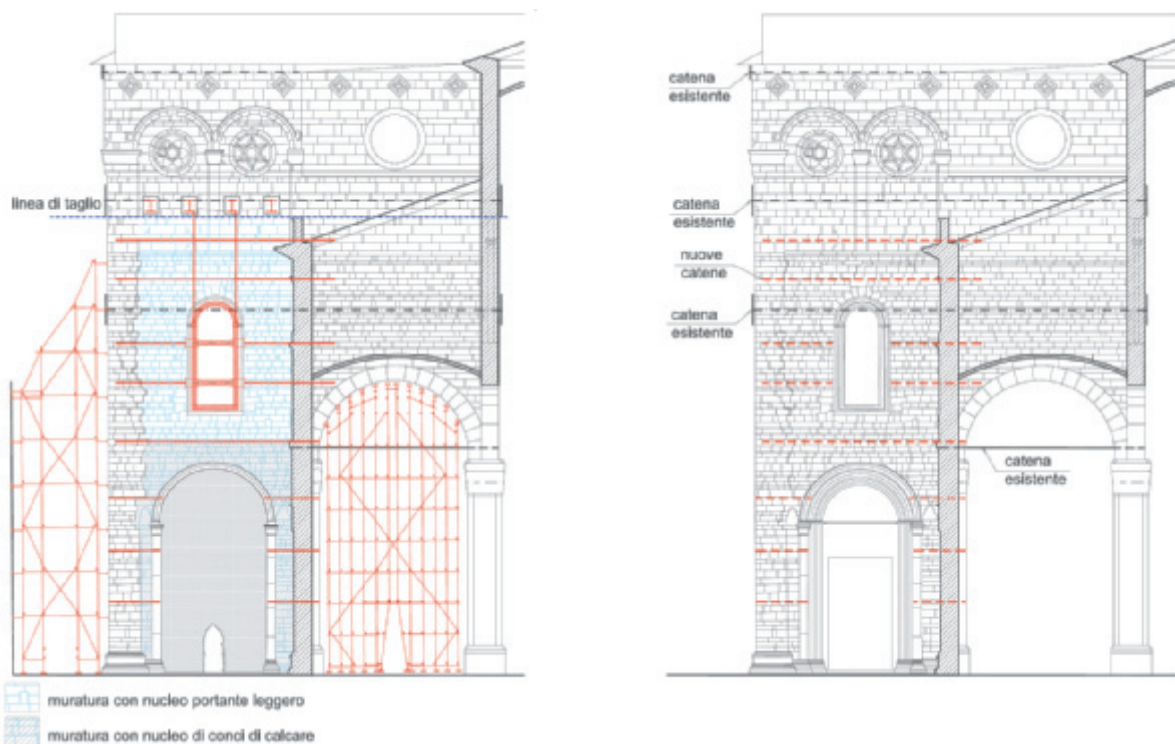


Fig. 11b

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gucci N., Barsotti R. (1995). "A non destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ", *Materials and Structures*, vol.28, n.179.
- [2] Giovannini P., Montevecchi N. (1999). "Il transetto settentrionale della cattedrale di S. Martino a Lucca", *Archeologia dell'Architettura* IV.
- [3] Baracchini C., Cecati F., De Falco A., Giovannini P., Gucci N., Montevecchi N., Parenti R. (2000). "1784 - 1786. Il restauro strutturale del transetto settentrionale della Cattedrale di S. Martino di Lucca. Una verifica a distanza di oltre due secoli", *Atti del Convegno "Scienza e Beni Culturali XVI 2000: La prova del tempo - Verifiche degli interventi per la conservazione del costruito"*. Bressanone (BZ).
- [4] Marchisio M., D'Onofrio L., De Falco A., Baroncini V., Morandi D. (2002). "Non destructive testing on masonry structures: a series of different methodologies applied on the cathedral of Lucca", *Proc. of the 8th meeting EEGS-ES, Aveiro, (CD-ROM proceedings)*.
- [5] Marchisio M., D'Onofrio L., De Falco A., Frediani L., Guidoni F. (2003). "New tomographic techniques (micro-seismic and geoelectrical) for the non-destructive testing on masonry structures", *International symposium "Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)"*. Berlin (CD-ROM proceedings).
- [6] De Falco A., Lucchesi M. (2003). "Explicit solutions for the stability of no-tension beam-columns" *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 3, No. 2.

Natale GUCCI, ingegnere civile-  
edile, professore ordinario di "Diagnostica e Consolidamento" nell'Università di Pisa, nella sua lunga carriera scientifica e accademica ha dato importanti contributi al progresso delle costruzioni civili, trattandone, in modo rigoroso, innovativo e a largo spettro, prevalentemente gli aspetti sperimentale e progettuale con particolare riferimento alla sicurezza statica e alla sismoresistenza. Muovendo dalle costruzioni metalliche e dalla tecnica della sperimentazione, da anni si interessa anche di edifici storici in muratura perseguendo la sicurezza statica con i saperi tecnici attuali, ma in modo coerente con il patrimonio di conoscenze che ha accompagnato la vita delle opere, ricercando cioè la sinergia fra la cultura tecnica e quella umanistica, per ricreare quella figura professionale cui si deve tutto l'antico degno di conservazione.

Anna DE FALCO, nata a Grosseto nel '67 si è laureata in Ingegneria Civile nel 1995 a Pisa, dove attualmente vive e lavora. Dottore di Ricerca in "Storia delle Scienze e delle Tecniche Costruttive", la ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa nel campo della Tecnica delle Costruzioni, occupandosi prevalentemente della diagnostica e del consolidamento degli edifici storici.